气候暖湿化背景下新疆极端气候事件时空演变特征分析

邬晓丹[1,2]， 罗 敏[1,2]， 孟凡浩[1,2]， 萨楚拉[1,2]， 尹超华[1,2]， 包玉海[1,2]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022）

摘 要：基于1982—2020年逐日气象数据，采用趋势分析、相关分析、Hurst指数及相对重要性等方法，分析新疆极端气候事件时空变化特征及规律。结果表明：新疆极端温度指数均表现出暖化趋势，不同极端温度指数呈增温趋势的站点占比为50.98%~100%。冷指数增温高于暖指数，空间上南疆暖化趋势较北疆更加显著。除持续干旱指数CDD外，极端降水指数整体均呈不显著上升趋势，占比为61.76%~85.29%。极端温度频率指数和雨日降水总量及中、小雨日数的增加对新疆暖湿化趋势贡献相对较大。除冰冻日数ID和年均雨日降水强度SDII外，其他极端气候指数变化均可持续，且极端降水的增加和多数极端温度尤其是冷指数暖化趋势在高海拔区域更明显。

关键词：气候暖湿化；极端气候；时空特征；海拔依赖性；新疆

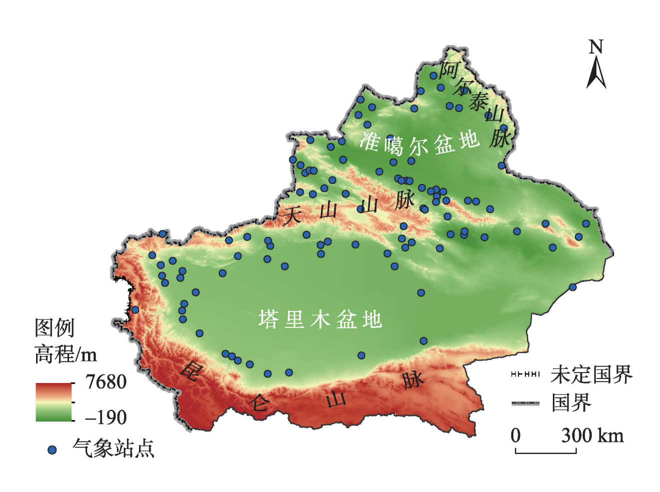
以全球变暖为主的气候变化对气候系统稳定性产生了极大影响，导致极端事件频繁发生。IPCC第六次报告指出，未来全球气候将持续变暖[1]，高温热浪增多，强降水增加，极端事件复杂多变且具有突发性，给区域生态环境和人类生产生活带来不利影响[2]。因此，深入了解极端气候事件的变化趋势对区域生态系统可持续发展有重要的现实意义，也受到越来越多国内外研究学者的关注。大量研究表明，过去半个世纪的气候变化过程中，全球极端降水和极端温度事件发生的频率、强度、持续时间和空间范围急剧增加，其变化更加敏感[3-5]。研究取得比较一致的结论是：暖指数相关的极端事件呈增加趋势，而冷指数则明显减少，极端降水强度及频率均增加。然而，受地形、大气环流等其他因素影响，不同区域极端气候变化情况差异明显，表现出独特的分布和变化趋势。

新疆地处我国西北地区，生态环境极其脆弱且对气候变化响应敏感。近年来新疆极端事件频发，对脆弱的生态环境造成巨大影响[6]。已有研究表明，1956—2001年新疆极端温度发生频率和强度均增加，增温速率达0.4 ℃·(10a)$^{-1}$，高于全国平均水平[7]。从季节来看，新疆冬季升温幅度高于夏季[8-9]。极端降水事件频发导致新疆整体显著变湿，但空间差异显著[10-11]，如北疆和南疆北部极端降水显著增加[12]，而东部和南部干旱加剧[13]。同时，较多学者对新疆不同区域的研究还表明，北极涛动、南方涛动等环流系统对新疆气候有显著影响，并且不同区域极端气候变化对环流指数的响应也不同[14-15]。以上研究对新疆极端气候事件取得了一些重要的研究成果，但大多研究仅从极端温度或极端降水的方面讨论该地区极端气候事件的变化趋势，但针对新疆极端事件变化的海拔依赖性及可持续性的相关研究还较少[16-17]。为此，本研究基于102个气象观测站的降水、最高温度、最低温度等数据，对新疆27个极端气候指数的时空变化特征进行分析，探讨极端气候指数变化的海拔依赖性，以期为该区域应对极端事件产生的不利影响，提高防灾减灾能力及区域可持续发展提供决策参考。

收稿日期：2022-04-18； **修订日期：**2022-07-25
基金项目：国家自然科学基金（42101030）；第三次新疆综合科学考察项目（2021xjkk1400）
作者简介：邬晓丹（1998-），女，硕士研究生，主要从事极端气候对水资源的影响. E-mail: wxd17748355132@163.com
通讯作者：罗敏. E-mail: luomin@imnu.edu.cn

1 研究区概况

新疆位于亚欧大陆中部，是我国西北干旱半干旱区主要组成部分，面积为166.49 km^2。海拔范围介于−190~7680 m之间，地形复杂多样，北部为阿尔泰山脉，南部为昆仑山脉，天山山脉位于新疆中部，呈现“三山夹两盆”的特征，且以天山为界，分为南疆和北疆（图1）。由于地处内陆，远离海洋，气候为典型的温带大陆性气候，年平均温度9~12 ℃，气温日较差大、年日照时数长，是太阳能资源比较丰富的地区。降水量稀少且集中，年均降水量约150 mm。新疆的高大山脉为拦截水汽进入内陆地区创造有利条件，形成山区降水远大于平原区降水的特征[18]，且迎风坡降水量大于背风坡。新疆河流水系众多，主要补给来源于冰川和多年积雪融水。



注：底图采用自然资源部标准地图制作，审图号为GS(2019)3333号，对底图边界无修改。下同。

图1 研究区地形及气象站点分布

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of meteorological stations

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所用气象数据包括新疆102个气象站点1982—2020年的逐日最高温度、最低温度和降水数据，来自国家气象科学数据中心。对异常值进行剔除后，使用RClimDex模型计算极端气候指数。本文选用ETCCDI定义的27个极端气候指数（表1），这些极端气候指标综合考虑了极端气候事件的强度、频率以及持续时间，能够从不同方面反映极端事件的变化。从地理空间数据云平台获取到新疆DEM数据，中国行政边界数据采用全国地理信息资源目录服务系统发布的1:1000000基础地理数据。

2.2 研究方法

2.2.1 *趋势分析法* 采用线性趋势法计算极端气候事件的变化趋势[19]，公式如下：

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(i \times T_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} T_i}{n \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \tag{1}$$

式中：*Slope*为线性回归方程的斜率；n为时间序列的长度；i为年序号（$1 \leqslant i \leqslant n$）；$T_i$为第$i$年极端气候指数值，若斜率为正则表示该气候指数值呈增加趋势，反之则表示呈下降趋势。

2.2.2 *重标极差（R/S）分析* R/S分析用于定量描述时间序列变化趋势的持续性特征，是一种非线性的科学预测方法[20]。R/S分析通过计算Hurst指数，判断时间序列中的趋势性成分，基本原理为：对于时间序列$\{\xi(t), t=1,2,\cdots,N\}$，取一个系列$\tau=1,2,\cdots,N$，对于任一$\tau$，定义均值序列：

$$\langle \delta \rangle_\tau = \frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\delta(t) \tag{2}$$

这里$\tau=1,2,\cdots$代表时滞。

用$X(t,\tau)$表示累积离差：

$$X(t,\tau) = \sum_{u=1}^{t}(\delta(u) - \langle \delta \rangle \tau),\ 1 \leqslant t \leqslant \tau \tag{3}$$

通过累积离差的最大值和最小值之差，计算出极差R，定义为：

$$R(\tau) = \max_{1 \leqslant t \leqslant \tau} X(t,\tau) - \min_{1 \leqslant t \leqslant \tau} (t,\tau) \tag{4}$$

标准差$S(\tau)$定义为：

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}\left(\delta(t) - \langle \delta \rangle_\tau^2\right)\right]^{\frac{1}{2}}, \tau = 1,2 \tag{5}$$

Hurst指数取值包括3种情况[20]：当$0<H<0.5$时，表明该时间序列未来变化趋势与过去相反，过去呈增加趋势则预示未来将呈减少趋势，即时间序列的变化前后负相关；当$H=0.5$时，表明时间序列为随机序列，不存在长期相关性，即时间序列前后的变化无关；当$0.5<H<1$时，表明时间序列是一个持续性序列，具有长期相关的特性，即未来的变化趋势与过去一致，过去呈增加趋势则预示未来将继续增加。

2.2.3 *Pearson相关分析* Pearson相关分析用来揭示地理要素之间相互关系的密切程度[21]。本研究

表1　极端气候指数定义与分类

Tab. 1　Definition and classification of extreme climate indices

类别	分类	指数名称	定义	指数代码	单位
极端降水指数	湿指数	单日最大降水量	每月最大1日降水量	Rx1day	mm
		连续5 d最大降水量	连续5日最大降水量	Rx5day	mm
		强降水量	单日降水量大于第95%的降水量和	R95p	mm
		极强降水量	单日降水量大于第99%的降水量和	R99p	mm
		年均雨日降水强度	单日降水量≥ 1mm的总量与总天数之比	SDII	$mm\cdot d^{-1}$
		雨日降水总量	雨日(日降水量≥ 1mm)降水总量	PRCPTOT	mm
		持续湿润指数	日降水量≥1 mm的最长连续天数	CWD	d
		小雨日数	每年日降水量(PRCP) ≥1 mm的总天数	R1mm	d
		中雨日数	每年日降水量(PRCP) ≥10 mm的总天数	R10mm	d
		暴雨日数	每年日降水量(PRCP) ≥25 mm的总天数	R25mm	d
	干指数	持续干旱指数	日降水量<1 mm的最长连续天数	CDD	d
极端温度指数	暖指数	暖昼日数	日最高温度>90%分位值的天数	TX90p	d
		暖夜日数	日最低温度>90%分位值的天数	TN90p	d
		夏季日数	年内日最高温度>25 ℃的天数	SU	d
		热夜日数	年内日最低温度>20 ℃的天数	TR	d
		日最高温度的极高值	单月内日最高温度的最大值	TXx	℃
		日最低温度的极高值	单月内日最低温度的最大值	TNx	℃
	冷指数	冷昼日数	日最高温度<10%分位值的天数	TX10p	d
		冷夜日数	日最低温度<10%分位值的天数	TN10p	d
		霜冻日数	年内日最低温度<0 ℃的天数	FD	d
		冰冻日数	年内日最高温度<0 ℃的天数	ID	d
		日最高温度的极低值	单月内日最高温度的最小值	TXn	℃
		日最低温度的极低值	单月内日最低温度的最小值	TNn	℃
	其他指数	暖持续日数	日最高温度>90%分位值的连续6日的天数	WSDI	d
		冷持续日数	日最低温度<10%分位值的连续6日的天数	CSDI	d
		生长季长度	至少6日平均日平均气温>5 ℃的初日与<5 ℃的终日间的日数	GSL	d
		温度日较差	年内日最高温度与最低温度的差值	DTR	℃

采用Pearson相关分析计算极端气候事件与区域气候变化的关系。对于2个变量x与y,其时间序列分别记为x_i与y_i(i=1,2,···,n),则二者的相关系数表示为:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(x_i-\bar{x}\right)\left(y_i-\bar{y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\bar{y}\right)^2}} \tag{6}$$

相关系数r的取值在[−1,1],$|r|$越大表示两变量相关性越强。

2.2.4　相对重要性计算　基于相对重要性分析方法量化极端气候指数对年平均温度(Tem)和年总降水量(Pre)的贡献。具体实现如下:首先对各因子进行归一化处理,然后利用多元回归法计算极端气候指数对Tem和Pre的解释程度。采用LGM[22]模型,将R^2分解为每个因子的贡献。该方法由R语言的"relaimpo"包完成[23]。

3　结果与分析

3.1　极端气候指数时间变化特征

由图2可知,暖指数中TN90p、TX90p、SU、TR、TNx及TXx均呈显著上升趋势(P<0.05),上升速率分别为2.58 d·(10a)$^{-1}$、1.62 d·(10a)$^{-1}$、3.76 d·(10a)$^{-1}$、3.21 d·(10a)$^{-1}$、0.45 ℃·(10a)$^{-1}$以及0.28 ℃·(10a)$^{-1}$。此外,TN90p比TX90p上升趋势更明显,且二者最低值均出现在1984年。冷指数TNn和ID相对稳定,变化幅度较小;而TN10p、TX10p、FD和TXn均呈下降趋势,且除TXn外,均通过显著性检验(P < 0.05)。TN10p下降趋势比TX10p更明显,TN10p和

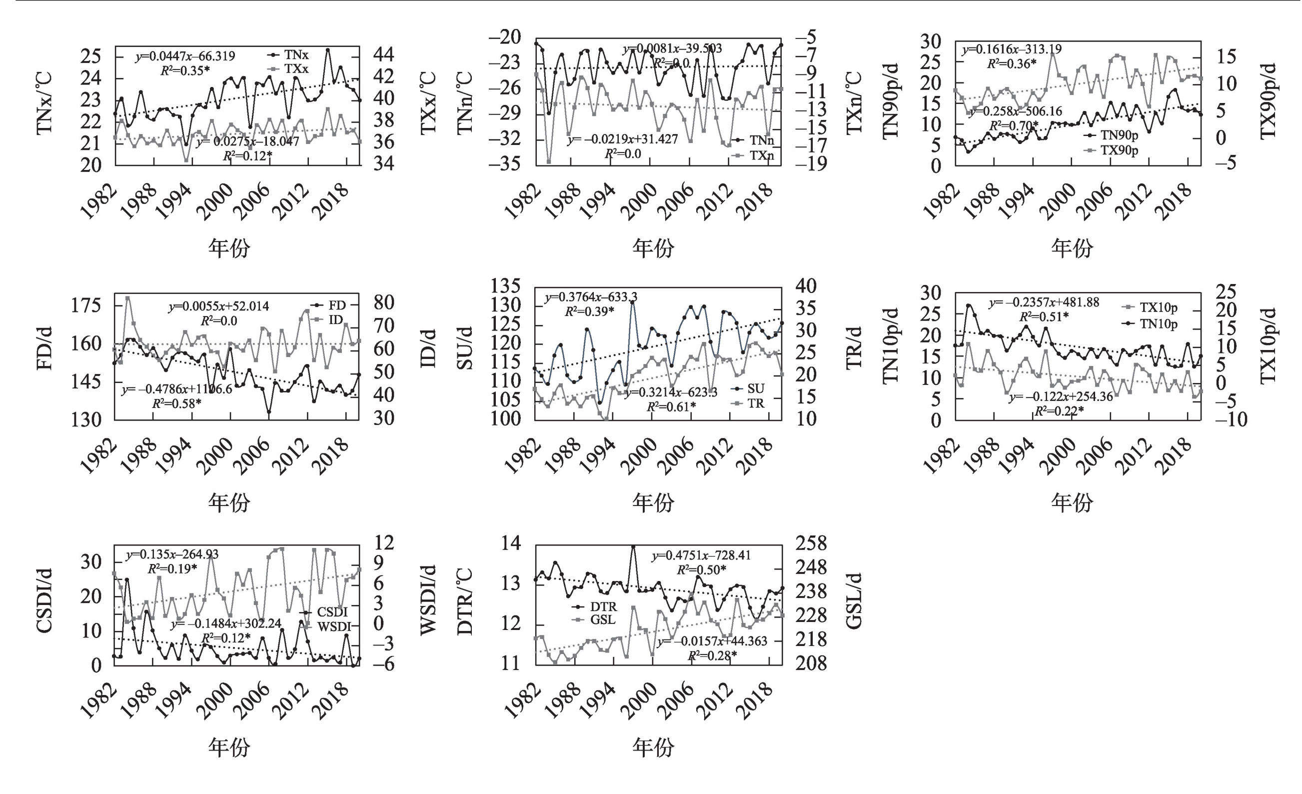


图2 1982—2020年新疆极端温度指数年际变化

Fig. 2 Interannual variations of extreme temperature indices in Xinjiang during 1982-2020

TX10p的最低值分别出现在2016年和2019年。其他指数中，由于日最高温度和日最低温度的不对称增温导致DTR指数呈显著下降趋势，下降速率为0.16 ℃·(10a)$^{-1}$；而冷指数的上升则对GSL日数的增加起着关键性作用[24]，导致GSL以4.75 d·(10a)$^{-1}$速率呈显著上升趋势。暖持续日数WSDI以1.35 d·(10a)$^{-1}$呈显著上升趋势，冷持续日数CSDI以-1.48 d·(10a)$^{-1}$呈显著下降趋势。综上所述，新疆16个极端温度指数均呈显著暖化趋势，且SU、TR、FD及GSL指数暖化趋势最为显著，与曹晴等[25]对全国冷暖指数研究结果一致。

整体上，研究时段内新疆地区湿指数均呈不同程度上升趋势(图3)，说明近39 a新疆极端降水量增加，极端降水事件增多。干指数CDD呈下降趋

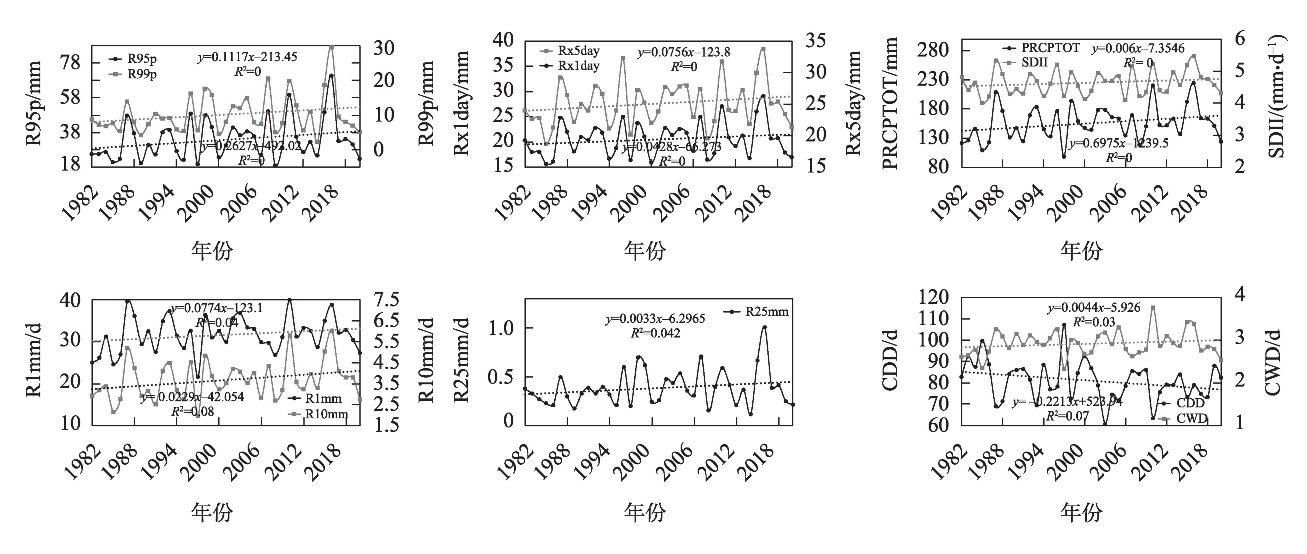


图3 1982—2020年新疆极端降水指数年际变化

Fig. 3 Interannual variations of extreme precipitation indices in Xinjiang during 1982-2020

势,下降速率为−2.21 d·(10a)$^{-1}$,进一步说明新疆的连续性干旱事件逐渐减少。湿指数中表征极端降水强度的指数R95p、R99p、Rx1day、Rx5day、SDII、PRCPTOT及表征极端降水频率的指数CWD、R1mm、R10mm、R25mm均呈增加趋势,反映出新疆降水量集中程度增加,易导致洪水等极端事件的发生。

3.2 极端气候指数空间变化特征

不同站点极端温度指数变化趋势呈现明显的空间异质性(图4)。暖指数中SU和TR呈显著上升趋势的站点主要分布在天山附近、南疆西南和北疆北部,占比分别为74.51%和71.58%(图5)。TXx在天山以东地区上升趋势明显,下降区域集中在北疆西部。与TXx相比,TNx呈下降区域的位置与之相似,但范围明显缩小,上升区域范围扩大,均分布在南疆及北疆和天山山区的交汇地带。TXx和TNx呈显著上升趋势的站点占比分别为27.45%和55.88%。大部分站点TX90p(74.51%)和TN90p(91.18%)均呈显著上升趋势且速率由北向南递增。

冷指数中,FD在所有气象站均呈减少趋势,且99.02%的站点减少趋势显著;ID在北疆大部分地区呈下降趋势,南疆则恰好相反。TXn、TNn、TX10p和TN10p变化速率整体由北向南递减。其中,TXn在天山附近呈显著下降趋势,而TNn在天山西部呈上升趋势,二者发生显著变化的站点占比均为0.98%。TX10p和TN10p呈显著下降趋势的站点占比分别为63.73%和80.39%。对于其他指数,所有站点GSL均呈增加趋势,且95.10%站点显著增加。79.41%的站点DTR呈下降趋势,且山区站点下降速率明显高于平原区;WSDI和CSDI呈上升和下降趋势的站点分布相反,同时变化速率由西向东呈递减。WSDI在新疆90.20%站点呈上升趋势,且仅在

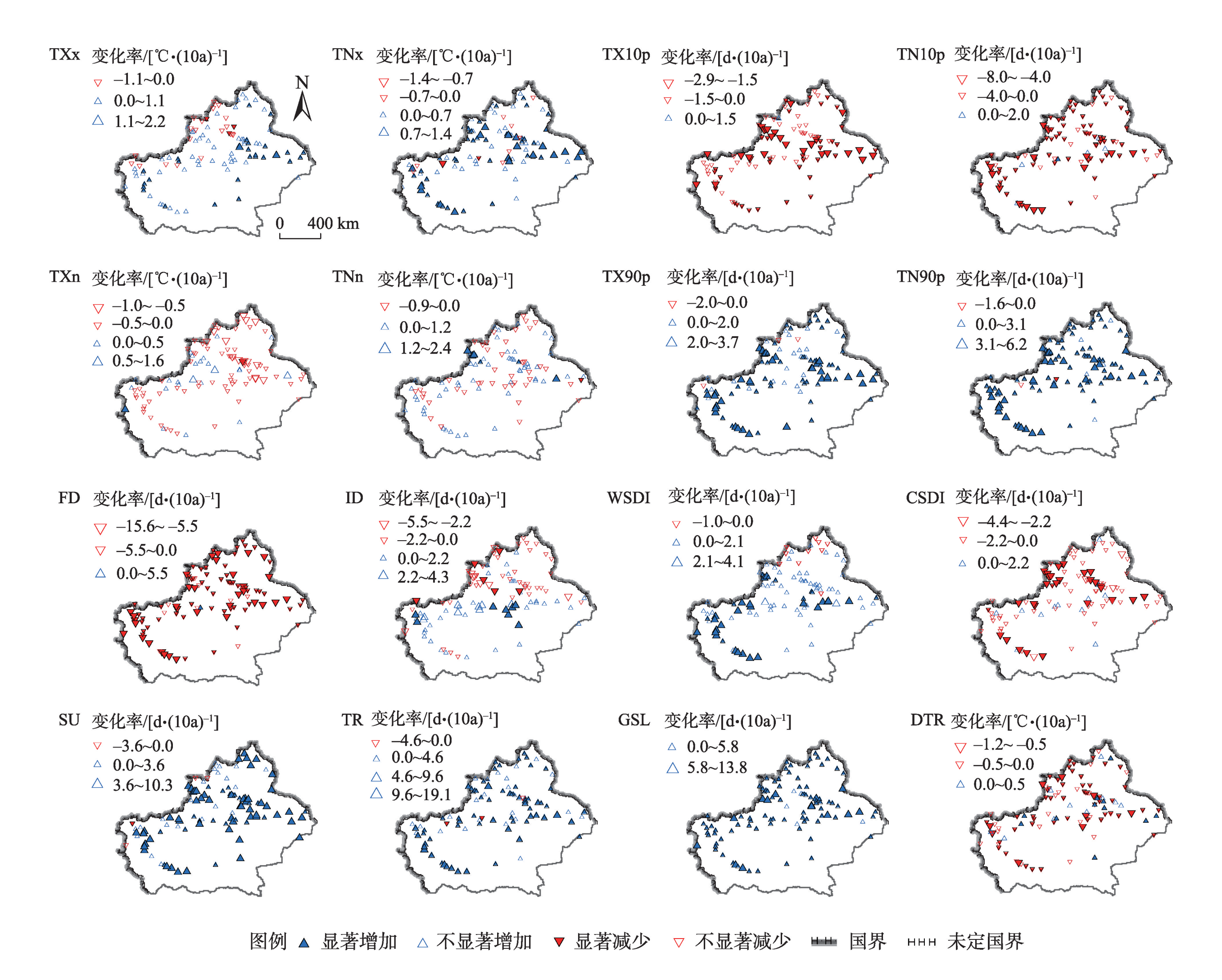


图4 1982—2020年新疆极端温度指数变化率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the changing rates of extreme temperature indices in Xinjiang during 1982−2020

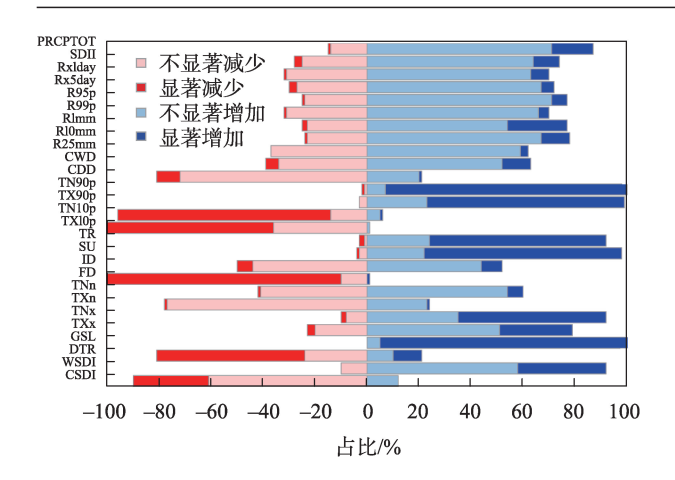


图5 极端气候指数不同站点变化趋势占比

Fig. 5 Proportion of different changing trends of extreme climate indices

北疆北部少数站点呈不显著下降趋势；CSDI在88.24%站点均呈下降趋势。该研究结果表明，极端高温持续时间增加，冷期爆发时间减少，与全国极端温度事件变化趋势基本一致[26]。

湿指数Rx1day、Rx5day、PRCPTOT、R1mm、R10mm及R25mm空间变化格局相似，增速总体由西向东呈递减(图6)。Rx1day和Rx5day呈增加趋势的站点分别占68.63%和70.59%，且主要分布于新疆西部，而PRCPTOT在85.29%站点均呈增加趋势，其中显著增加的站点主要分布在新疆西北部；R1mm、R10mm及R25mm呈上升趋势的站点分别为75.49%、76.47%和62.63%，其中R1mm上升趋势较R10mm和R25mm更显著。对于R95p和R99p在全疆大部分站点呈增加趋势，站点占比为75.49%和68.63%，且主要分布在天山以北地区。SDII能够反映新疆平均降水强度，72.55%站点SDII呈上升趋势。干指数CDD在79.41%的站点均呈下降趋势，仅在塔里木盆地北缘呈上升趋势。CDD和CWD在一定程度上表现为相反的变化趋势，但CDD相对CWD下降更加显著，下降幅度更大。总体来说，近39 a新疆极端降水事件呈增加趋势，且山区增加趋势高于平原地区。

3.3 极端气温降水指数的贡献率

图7显示了包括年平均温度(Tem)在内的各温度指标之间的相关性。除TXn和DTR，其他极端温度指标与Tem相关性均通过显著性检验。极端温度频率指数(TX90p、TN90p、TX10p、TN10p)较强度指数与Tem的相关性更高，相关系数绝对值均大于0.85。其中Tem与高温频率指数TX90p、TN90p呈显著正相关，与低温频率指数TX10p、TN10p呈显著负

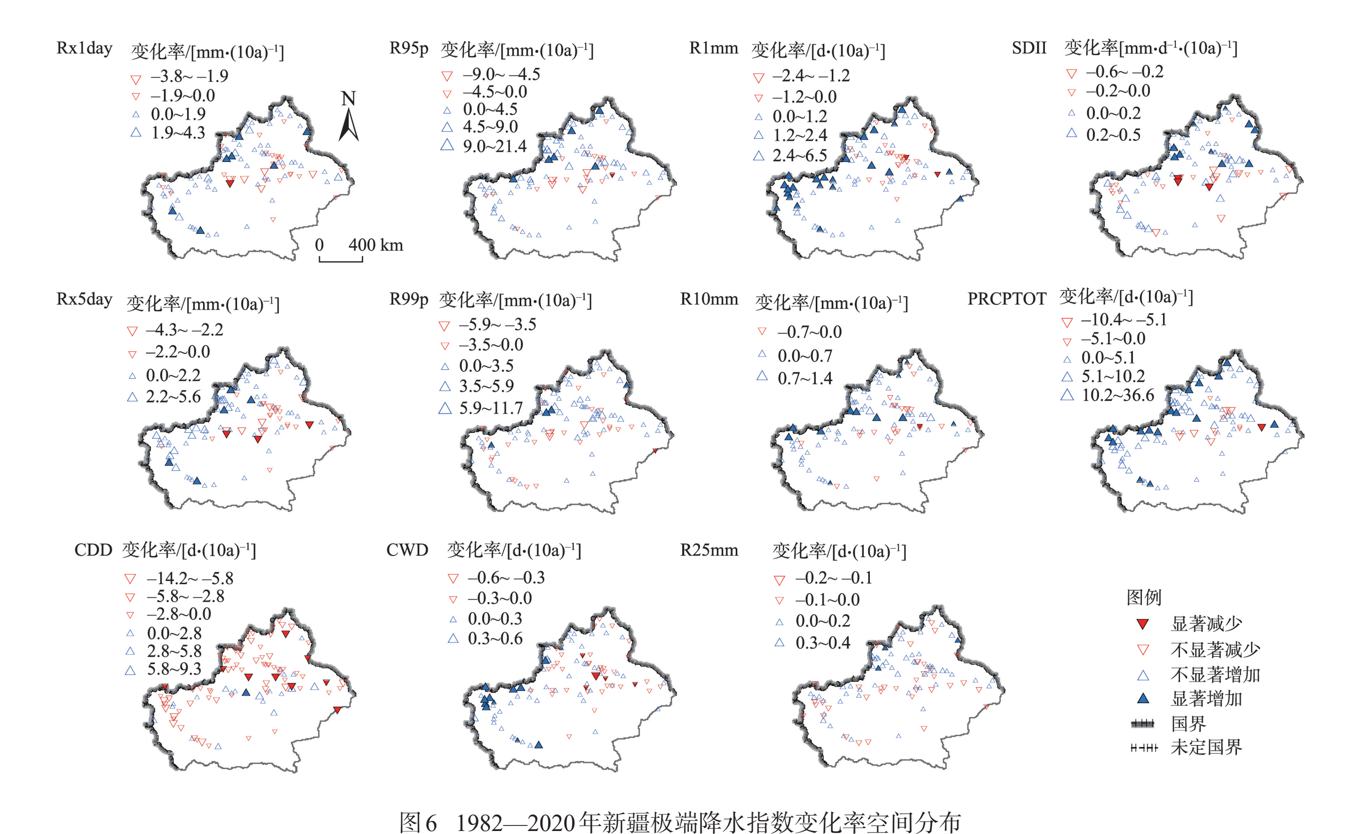


图6 1982—2020年新疆极端降水指数变化率空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the changing rates of extreme precipitation indices in Xinjiang during 1982–2020

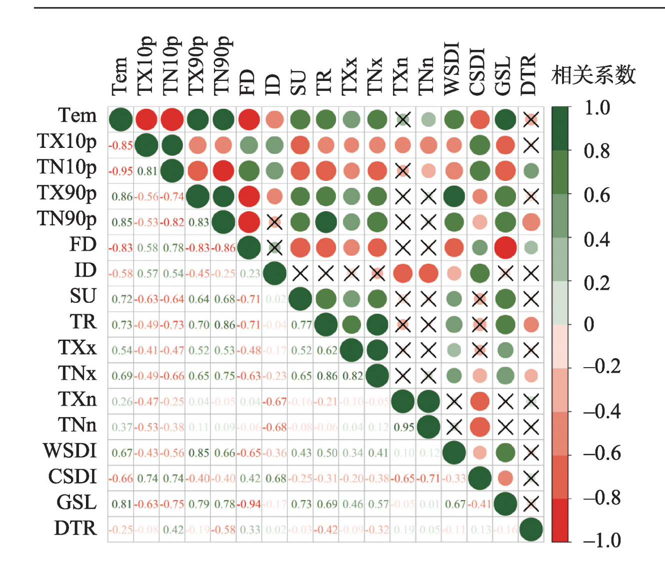


图7 1982—2020年极端温度指数与年平均温度之间相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients between extreme temperature indices and mean annual temperatures during 1982–2020

相关。高温频率指数相对重要性大小均为0.92,低温频率指数相对重要性大小均大于1.05(表2)。低温频率指数与FD、ID呈正相关,高温频率指数与SU、TR呈正相关。日最低气温的极低值TNn和日最高气温的极低值TXn之间相关系数高达0.95,但对Tem的相对重要性较低。频率指标与Tem相关性较强度指标更大,贡献率更高。

除CDD外,年降水量(Pre)与极端降水指数均呈显著正相关(图8)。其中R1mm、R10mm、Rx1day、Rx5day、R95p和PRCPTOT与年降水量的相关系数均大于0.88。其中,CDD与Pre呈显著负相关,相关系数为−0.75。R99p与Pre的相关系数为0.75。通过相对重要性分析得出(表3),R25mm和R99p对Pre的相对重要性最小,为0.59。其余各指数对Pre相对贡献大小的排序为:PRCPTOT>R1mm>R10mm>R95p>Rx5day>Rx1day>CWD>SDII>CDD。

通过对新疆极端气候指数变化进行R/S分析,结果表明多数极端气候指数均呈持续稳定变化状态(图9)。暖指数均表现为持续增加趋势,其中TX90p、TN90p、SU、TR的Hurst值均大于0.7,表现为强持续性。冷指数中除ID外变化趋势均可持续。其中,TNn呈持续增加趋势,其他指数均呈持续减少趋势。ID的Hurst指数值低于0.5,表现为反持续从上升到下降。极端降水指数中SDII的Hurst指数值为0.46,表现为反持续从增加到减少。其余指数的Hurst值均大于0.5,说明整体上新疆未来极端降水事件依然呈增加态势。值得指出的是,极端温度指数相较于极端降水指数的Hurst指数值更大,持续性更强,可能是极端温度指数较极端降水的稳定性较强、波动性较小导致。

3.4 极端气候变化的海拔依赖性

各极端指数变化的海拔依赖性如表4所示。暖指数中SU和TR变化速率与海拔呈显著负相关,变暖程度随海拔升高而减缓。其他暖指数中,TNx变化速率与海拔呈负相关,而TX90p、TN90p、TXx变化速率与海拔呈正相关,但相关性均未通过显著性检验。冷指数中TX10p、ID、FD和TNn与海拔呈负相关,说明随海拔升高冷指数减小速率加快,反映出随海拔升高暖化速率加快。TXn变化速率与海拔呈显著正相关,说明海拔越高,发生日最高温度最小值的可能性就越大。其他指数的变化速率均与海拔呈正相关。除R99p和CDD外,海拔与其他极端降水指数均呈正相关,且除Rx1day、Rx5day、SDII、R25mm外,均通过显著性检验。说明这些极端降水指数随海拔升高变化速率加快,呈显著的正向海拔依赖性。CDD与海拔呈不显著负相关,反映了持续干旱日数的降低现象在高海拔地区更加明显。

4 讨论

本文采用16个极端温度指数和11个极端降水指数,分析了1982—2020年新疆极端气候事件的变化特征。结果表明,新疆高温事件表现为上升趋势,低温事件呈下降趋势,极端降水增加主要集中在山区、新疆北部及西部。夜温(TN10p、TN90p)增温明显高于昼温(TX10p、TX90p),表明夜间温度升高对整体温度变暖的贡献更大。已有研究表明,陆地表面近50 a升温存在明显不对称性,夜温升高速

表2 极端温度指数对平均温度贡献率

Tab. 2 Contribution of extreme temperature index to average temperature

气温因子	TN10p	TX10p	TX90p	TN90p	FD	GSL	SU	TR	ID	CSDI	WSDI	TNx	TXx	TNn	TXn	DTR
贡献率	0.131	0.105	0.092	0.092	0.079	0.075	0.065	0.059	0.056	0.054	0.050	0.048	0.029	0.023	0.017	0.015

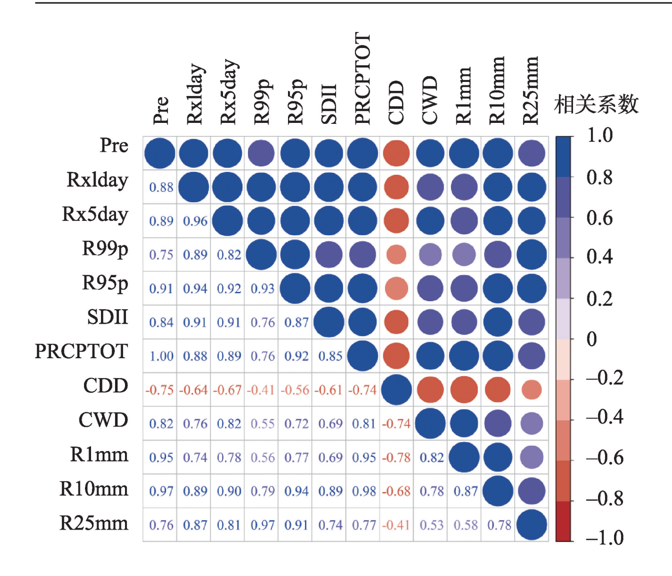


图8 1982—2020年极端降水指数与年降水量之间相关系数

Fig. 8 Correlation coefficients between extreme precipitation indices and annual precipitation during 1982–2020

率是昼温的1.4倍[27]，可能与云量、太阳辐射、土壤湿度和大气环流的改变有关。其中云量的增加会导致减少白天入射短波辐射到地球表面来降低昼温并通过夜间拦截输出的长波辐射来增加夜温，因此被认为是最为关键的因素[28]。极端气候事件变化区域上同样存在显著差异，昼温（TX10p、TX90p）变化率最大区域位于天山山区，夜温（TN10p、TN90p）和其他指数（WSDI、CSDI）变化最明显区域位于南疆和天山区域。由于天山对中国冬季风的阻挡作用，可能导致天山以南在秋冬季节受北部寒潮的影响较小，升温更加明显[29]。此外，天山以南降水稀少、潜在蒸发强烈，导致南坡极端指数升温幅度更加明显。表征极端降水的各项指数总体变化趋势均不显著。PRCPTOT呈不显著上升趋势，说明新疆降水总量不显著增加，同时CWD增加及

表3 极端降水指数对年降水量贡献率

Tab. 3 Contribution of extreme precipitation index to annual precipitation

降水因子	PRCPTOT	R1mm	R10mm	R95p	Rx5day	Rx1day	CWD	SDII	CDD	R25mm	R99p
贡献率	0.148	0.132	0.122	0.100	0.085	0.081	0.074	0.073	0.063	0.059	0.059

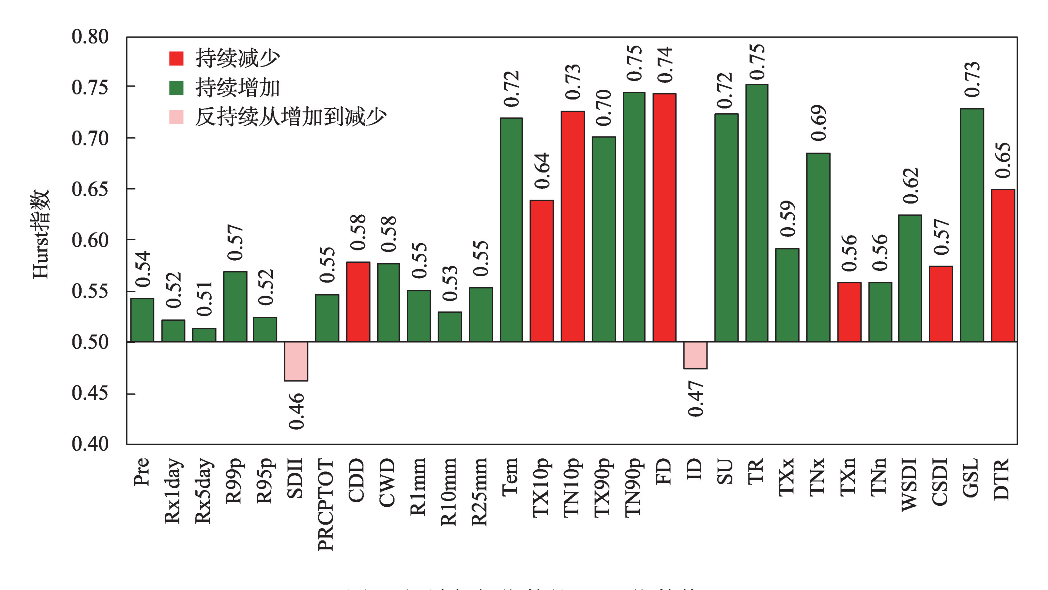


图9 极端气候指数的Hurst指数值

Fig. 9 Hurst values of the extreme climate indices

表4 极端气候指数变化的海拔依赖性

Tab. 4 Elevation dependence of the changes in the extreme climate indices

变化趋势	检验标准	温度指数	降水指数
不显著负相关	*Slope* < 0，P > 0.05	Tem、FD、TNx、TNn	R99p、CDD
显著负相关	*Slope* < 0，P < 0.05	TX10p、ID、SU、TR	
不显著正相关	*Slope* > 0，P > 0.05	TN10p、TX90p、TN90p、TXx、WSDI、CSDI、DTR	Rx1day、Rx5day、SDII、R25mm
显著正相关	*Slope* > 0，P < 0.05	TXn、GSL	Pr、R95p、CWD、PRCPTOT、R1mm、R10mm

CDD减少也进一步证实新疆降水量增加,干旱情况得到缓解,这与施雅风等[30]研究新疆干湿转变结果相一致。本研究发现,极端降水山区增加趋势明显高于平原区,与赵丽等[31]研究结果一致。可能是地形的阻挡和抬升作用导致盛行气流产生较强的垂直上升运动,使得山区极端降水增加明显[32]。特别是在天山西部地区极端降水指数均呈上升趋势,可能是伊犁河谷整体地势东高西低,导致西部暖湿气流停积[33]。从温度和降水量的变化来看,新疆气候呈现"暖湿化"特征,针对这一成因,多数专家认为是来自高纬、热带印度洋、阿拉伯海和局地的水汽输送增强所致[34-36],未来可通过进一步分析蒸散指数等来判断新疆暖湿化程度。

通过分析极端气候指数变化对Pre和Tem的关系发现,极端气候指数与Pre、Tem之间相关性较好。极端温度频率指数TX90p、TN90p、TX10p、TN10p对Tem相对重要性最好;极端降水频率指数R1mm、R10mm和强度指数PRCPTOT对Pre的相对重要性较好。极端气候指数变化具有较强的海拔依赖性,Pepin等[17]指出变暖速度随海拔升高而加快,本研究结果表明,多数极端温度指数尤其是冷指数在较高海拔变暖速度更快。Yao等[12]指出中国干旱区降水增加趋势随海拔升高而增大,与本研究大多数极端降水指数变化与海拔呈正相关这一结果相符。但是由于受到特殊地理、气候以及经济因素,新疆的气象站点分布不均匀,尤其是天山西部等地,因此加强站点建设成为一项重要任务[35]。

为了提高人类对于极端气候事件灾害防御能力,本文利用Hurst指数对极端气候指数变化的持续性进一步分析,发现未来高温指数仍持续增加,低温指数持续减少,新疆降水量仍然保持增加趋势同时发生极端降水的可能性有增无减,与李佳秀等[37]关于新疆极端气候事件趋势预测的结论相一致。此外,以上结果表明,新疆未来可能存在极端高温事件以及洪涝灾害事件增加的风险,应当引起相关部门重视。

5　结　论

(1) 新疆大部分暖指数TN90p、TX90p、SU、TR、TNx、TXx均呈显著上升趋势,除TNn和ID变化相对稳定外,其他冷指数均呈显著下降趋势。极端降水指数中除干指数CDD呈下降趋势,湿指数均呈上升趋势。整体上,极端温度指数变化显著性高于极端降水指数。

(2) 从空间分布来看,暖指数呈大范围上升趋势同时冷指数呈大范围下降趋势。暖指数上升趋势较明显的地区均集中于南疆。新疆干旱事件逐渐减少,除CDD外,极端降水指数呈增加趋势的站点占比介于61.76%~85.29%。极端温度频率指数对平均温度升高贡献相对更高,而雨日降水总量及中、小雨日数的增加对降水量的贡献较大。

(3) 除ID外,未来新疆地区表征高温事件的指数将持续增加,表征低温事件的指数将持续减少;除SDII外,极端降水指数变化均可持续。多数极端温度指数尤其是低温指数在高海拔区域变暖趋势更加明显,极端降水指数呈显著的正向海拔依赖性。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[R]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2022.

[2] 赵雪雁, 雒丽, 王亚茹, 等. 1963—2012年青藏高原东缘极端气温变化特征及趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2113–2122. [Zhao Xueyan, Luo Li, Wang Yaru, et al. Extreme temperature events in eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau form 1963–2012[J]. Resources Science, 2014, 36(10): 2113–2122.]

[3] He Zhibin, Du Jun, Chen Longfei, et al. Impacts of recent climate extremes on spring phenology in arid-mountain ecosystems in China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260: 31–40.

[4] Liu Zhaofei, Yao Zhijun, Huang Heqing, et al. Evaluation of extreme cold and drought over the Mongolian Plateau[J]. Water, 2019, 11(1): 74

[5] Menzel A, Seifert A, Estrella N. Effects of recent warm and cold spells on European plant phenology[J]. International Journal of Biometeorology, 2011, 55(6): 921–932.

[6] 杨霞, 周鸿奎, 赵克明, 等. 1991—2018年新疆夏季小时极端强降水特征[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 762–773. [Yang Xia, Zhou Hongkui, Zhao Keming, et al. Variation features of hourly precipitation in Xinjiang Province during 1991–2018[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 762–773.]

[7] 徐贵青, 魏文寿. 新疆气候变化及其对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 14–18. [Xu Guiqing, Wei Wenshou. Climate change in Xinjiang and its impact on the ecological environment[J]. Arid Land Geography, 2004, 27(1): 14–18.]

[8] 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 北疆地区1961—2010年极端气温

事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 296−302. [Zhang Yanwei, Ge Quansheng, Jiang Fengqing, et al. Evolution characteristics of the extreme high and low temperature event in North Xinjiang in 1961−2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(2): 296−302.]

[9] Guan Jingyun, Yao Junqiang, Li Moyan, et al. Historical changes and projected trends of extreme climate events in Xinjiang, China [J]. Climate Dynamics, 2022, 59: 1−22.

[10] 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 新疆极端降水概率分布特征的时空演变规律[J]. 灾害学, 2011, 26(2): 11−17. [Li Jianfeng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong, et al. Spatial-temporal evolution pattern of the probability distribution characteristics of extreme precipitation in Xinjiang Autonomous Region[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(2): 11−17.]

[11] 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国西北极端降水事件年内非均匀性特征分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 178−184. [Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. Analysis on inner-annual in homogeneity characteristic of extreme precipitation events over Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 178−184.]

[12] Yao Junqiang, Yang Qing, Mao Weiyi, et al. Precipitation trend-elevation relationship in arid regions of the China[J]. Global and Planetary Change, 2016, 143: 1−9.

[13] Zhang Qiang, Li Jianfeng, Singh V P, et al. SPI-based evaluation of drought events in Xinjiang, China[J]. Natural Hazards, 2012, 64 (1): 481−492.

[14] Chen Yaning, Deng Haijun, Li Baofu, et al. Abrupt change of temperature and precipitation extremes in the arid region of Northwest China[J]. Quaternary International, 2014, 336: 35−43.

[15] Ma Long, Wu Jinglu, Abuduwaili J. Variation in aeolian environments recorded by the particle size distribution of lacustrine sediments in Ebinur Lake, Northwest China[J]. Springerplus, 2016, 5 (1): 1−8.

[16] Hu Wenfeng, Yao Junqiang, He Qing, et al. Changes in precipitation amounts and extremes across Xinjiang (Northwest China) and their connection to climate indices[J]. PeerJ, 2021, 9: e10792.

[17] Pepin N, Bradley R S, Diaz H F. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world[J]. Nature Climate Change, 2015, 5 (5): 424−430.

[18] 周聿超. 新疆河流水文水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1999: 1−10. [Zhou Yuchao. Hydrology and Water Resources of Xinjiang Rivers[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Health Press, 1999: 1−10.]

[19] 陈彦光. 地理数学方法: 基础和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 40−59. [Chen Yanguang. Mathematical Methods for Geography: Foundations and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2010: 40−59.]

[20] Huang Hao, Zhang Bo, Cui Yanqiang, et al. Analysis on the characteristics of dry and wet periods in the Yangtze River Basin[J]. Water, 2020, 12(11): 2960.

[21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 37−46. [Xu Jianhua. Mathematical Methods in Modern Geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2002: 37−46.]

[22] Gromping U. Relative importance for linear regression in R: the package relaimpo[J]. Journal of Statistical Software, 2006, 17(1): 1−27.

[23] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 等. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 382−388. [Chai Lifu, Tian Li, Ao Yong, et al. Influence of human disturbance on the change of vegetation cover in the Tibetan Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation , 2021, 28(6): 382−388.]

[24] 黄浩, 张勃, 黄涛, 等. 近30 a甘肃省河东地区极端气温指数时空变化特征及趋势预测[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 319−328. [Huang Hao, Zhang Bo, Huang Tao, et al. Quantifying and predicting spatial and temporal variations in extreme temperatures since 1990 in Gansu Province, China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43 (2): 319−328.]

[25] 曹晴, 郝振纯, 傅晓洁, 等. 1960—2017年中国极端气候要素时空变化分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 11−17. [Cao Qing, Hao Zhenchun, Fu Xiaojie, et al. Analysis of spatial-temporal changes of extreme climatic elements in China from 1960 to 2017[J]. Yellow River, 2020, 42(2): 11−17.]

[26] Wang Xuyang, Li Yuqiang, Wang Mingming, et al. Changes in daily extreme temperature and precipitation events in mainland China from 1960 to 2016 under global warming[J]. International Journal of Climatology, 2020, 41(2): 1465−1483.

[27] Du Ziqiang, Zhao Jie, Liu Xuejia, et al. Recent asymmetric warming trends of daytime versus nighttime and their linkages with vegetation greenness in temperate China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(35): 35717−35727.

[28] 朱军涛, 郑家禾. 昼夜不对称变暖对陆地生态系统的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(4): 777−783. [Zhu Juntao, Zheng Jiahe. Effects of diurnal asymmetric warming on terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Eclogy, 2022, 41(4): 777−783.]

[29] 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960—2015年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1379−1390. [Ding Zhiyong, Dong Yiyang, Lu Ruijie et al. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains Area, Northwest China, during 1960−2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1379−1390.]

[30] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219−226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219−226.]

[31] 赵丽, 杨青, 韩雪云, 等. 1961—2009年新疆极端降水事件时空差异特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 550−557. [Zhao Li, Yang

Qing, Han Xueyun, et al. Spatial and temporal differences of extreme precipitation during 1961–2009 in Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 550–557.]

[32] 于晓晶, 赵勇. 地形对天山夏季降水影响的模拟[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 1133–1143. [Yu Xiaojing, Zhao Yong. Simulation of topographic effects on summer precipitation in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(4): 1133–1143.]

[33] 慈晖. 1961—2010年新疆极端气温时空演变特征研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(4): 129–138. [Ci Hui. Spatial and temporal evolution of temperature extremes in Xinjiang from 1961 to 2010[J]. Journal of Zhongshan University, 2015, 54(4): 129–138.]

[34] 陈活泼, 孙建奇, 范可. 新疆夏季降水年代际转型的归因分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 1844–1851. [Chen Huopo, Sun Jianqi, Fan Ke. Possible mechanism for the interdecadal change of Xinjiang summer precipitation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 1844–1851.]

[35] 姚俊强, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 新疆气候水文变化趋势及面临问题思考[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1498–1511. [Yao Junqiang, Chen Jing, Dilinuer Tuoliwubieke, et al. Trend of climate and hydrology change in Xinjiang and its problems thinking [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5): 1498–1511.]

[36] 赵兵科, 蔡承侠, 杨莲梅, 等. 新疆夏季变湿的大气环流异常特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 434–442. [Zhao Bingke, Cai Chengxia, Yang Lianmei, et al. Atmospheric circulation anomalies during wetting summer over Xinjiang region[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 434–442.]

[37] 李佳秀, 杜春丽, 杜世飞, 等. 新疆极端降水事件的时空变化及趋势预测[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1103–1112. [Li Jiaxiu, Du Chunli, Du Shifei, et al. Temporal-spatial variation and trend prediction of extreme precipitation events in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1103–1112.]

New characteristics of spatio-temporal evolution of extreme climate events in Xinjiang under the background of warm and humid climate

WU Xiaodan[1,2], LUO Min[1,2], MENG Fanhao[1,2], SA Chula[1,2], YIN Chaohua[1,2], BAO Yuhai[1,2]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from 1982 to 2020, the spatial and temporal variability characteristics of extreme climate events in Xinjiang were analyzed using the methods of trend analysis, correlation analysis, Hurst index, and relative importance. The results indicate that the extreme temperature indices in Xinjiang show a warming trend, and the proportion of stations with different extreme temperature indices show a warming trend of 50.98%–100%. The temperature of the cold index was higher than that of the warm index, and the warming trend in southern Xinjiang is more significant than that in northern Xinjiang. Except for the continuous drought index, CDD, the overall extreme precipitation indices showed no significant upward trend, and the proportion of stations with an upward trend was 61.76%–85.29%. The increase in extreme temperature frequency indices, total precipitation, and moderate and light rain days significantly contributed to the warming and humidification trend in Xinjiang. Except for freezing days ID and annual mean rain days precipitation intensity SDII, the changes of other extreme climate indices were sustainable, and the extreme precipitation and warming trend of most extreme temperatures, especially the cold index, were more obvious at high altitudes.

Keywords: warm and humid climate; extreme climate; spatiotemporal characteristics; altitude dependence; Xinjiang